Production Systems and Information Engineering
Volume 11 (3), pp. 1-9
doi: https://doi.org/10.32968/psaie.2023.3.1

HATÉKONY PIXEL ALAPÚ RAJZOLÁS A GYAKORLATBAN

PÉTER MILEFF
University of Miskolc, Hungary
Institute of Information Technology
mileff@iit.uni-miskolc.hu

Abstract. A grafikus feldolgozó egység (GPU) mára életünk szerves részévé vált mind az asztali mind pedig a hordozható eszközök révén. A dedikált hardvernek köszönhetően a vizualizáció jelentősen felgyorsult, a szoftverek pedig kizárólag ma már csak a GPU-t használják a raszterizáció folyamatában. A fejlődés eredményeképpen a háromszög alapú renderelés vált gyakorlatilag kizárólagossá a GPU-k miatt, a pixel alapú képmanipulációt leggyakrabban shaderek segítségével végzik el. A mai GPU alapú csővezeték azonban nem tudja azt a rugalmasságot nyújtani, mint a korábbi szoftveres megvalósítás, amikor sokkal több lehetőség volt a pixelek manipulációjára. Jelen cikk a pixel alapú raszterizáció hatékony szoftveres megvalósításával foglalkozik. A jelenlegi GPU alapú rajzolás folyamatának áttekintése után, megmutatjuk, hogy ebben a környezetben miként érhető el mégis a pixel alapú rajzolás. Végül a klasszikus pixel tárolási megoldástól hatékonyabb tárolási és megjelenítési forma kerül bemutatásra, amely teljesítménye messze felülmúlja a korábbi megoldást.

Keywords: Szoftveres raszterizáció, optimalizáció, pixel rajzolás

1. Bevezetés

A magas minőségű számítógépes vizualizáció napjain egyik fontos területe és követelménye. A modern képszintézis gyakorlatilag ma már szinte minden területen jelen van legyen az számítógépes játék, multimédiás alkalmazás, tervező program vagy egyéb grafikus szoftver. Ma a vizualizáció területét a GPU alapú megjelenítés uralja. Maga a hardver nagymértékű fejlődésen van túl, az ipar közel 20 év fejlesztést tudhat maga mögött. Legfőbb mozgatórugója a számítógépes játékipar volt, ahol állandó törekvés a jobb, a valósághoz még inkább közelebb álló megjelenítési minőség. A GPU-k használata gyakorlatilag standard-é vált, minden main mainstream operációs rendszer rendelkezik zárt vagy akár nyílt forráskódú megfelelő meghajtó programmal annak ellenére, hogy a videókártyák felépítése nem nyitott a meghajtó programot írni kívánók számára.

A GPU azonban nem csodaeszköz. Áruk és áramfogyasztásuk az utóbbi években jelentősen megnövekedett. Egy modern videokártya fogyasztása aktív használat közben elérheti akár a 280W-ot is. Megjelenésük jelentősen átalakította a vizualizáció addig ismert folyamatát. A fejlesztőknek szakítani kellett az addigi szoftveres megjelenítés módszereivel és alkalmazkodni kellett a videókártya meghajtók programozható API-jához (OpenGL, DirectX). A vizualizáció eme meghatározott folyamata az évek során már nem nagyon változott. Kezdetben úgynevezett fix funkciós csővezetéket használhattunk a képszintézisben, később az árnyalók megjelenésével a csővezeték különböző részei már a fejlesztők által is programozhatóvá vált ezzel utat nyitva a programokban használt egyedi

megoldások felé. Nagyon leegyszerűsítve talán azt is mondhatjuk, hogy a vizualizáció GPU előtti időszakában a programozónak teljhatalma volt a, gyakorlatilag minden pixel-t képes volt kezelni a képernyőn és a memóriában, A GPU-k megjelenésével ez a nagymértékű rugalmasság eltűnt, főleg a shader világ előtt.

A mai vizualizáció drótváz modellre épül. Minden objektum mögött ott kell legyen egy háromszögekből álló háló, amely az objektum "alakját" definiálja. Az úgynevezett textúra pedig erre a hálózatra kerül rá a Texture mapping technikával. Ahhoz, hogy a vizualizáció gyors legyen, a videokártya úgy lett kifejlesztve, hogy saját memóriával rendelkezzen. Tartalmaznia kell az összes olyan elemet, objektumot, amely rajzolára kerül. Ezért minden szoftver egyik első lépése (pályák betöltése) az, hogy a rajzolás előtt minden elemet feltölt a GPU RAM-ba. A GPU tehát olyan, mint egy külön sziget. A jelenlegi GPU alapú raszterizáció jól működik, hatalmas ipar épül rá. Előnyként jelenik meg, hogy rögzített programozási logikának megfelelően a programozók egy egységes magasabb absztakciós szintet kapnak a kezükbe, nem szükséges a vizualizációt alacsony szintű programozása. A shaderek megjelenésével lehetővé vált a fix funkciós csővezeték leváltása, egy fejlesztői oldalról való jobb programozhatóság bevezetése.

Azonban a programozó rá van kényszerítve azokra a megoldásokra, amelyet a GPU API-k (OpenGL, DirectX) nyújtanak. Bár az árnyalók nagymértékben javítják a GPU-k programozhatóságát, nem tudják elérni a szoftveres raszterizáció adta lehetőségeket és vélhetően soha nem is fogják, amely megadja azt a rugalmasságot, mint a korai időkben volt. Ma már nem tudunk pixelekkel érdemben foglalkozni és a számítógépes vizualizációt tanúlni kívánók számára jelentősen megnőtt a belépési pont [16].

Jelen cikk ezért azt a célt tűzte ki, hogy megvizsgálja azokat a lehetőségeket, amellyel igaz, hogy szoftveresen, de elérhetők a pixel szintű programozhatóság. Megmutatjuk, hogy a CPU segítségével hogyan lehet hatékonyan rajzolni, mindezeket pedig mérési tesztekkel igazoljuk.

2. Pixel alapú szoftveres vizualizáció

A számítógépes vizualizáció korai szakaszában csak szoftveres, azaz CPU alapú megjelenítést használt minden szoftver. Ezek a szoftverek maguk kezelték a pixeleket, a VESA VBE (VESA BIOS Extensions) szabványosított interfésznek megfelelően pedig nem volt szükség speciális videókártya meghajtóra vagy egyéb API-ra (OpenGL, DirectX). A VBE egy kiegészítése volt az INT 10h BIOS video szolgáltatásoknak. A kívánt felbontás és a pixelek elérése (írás/olvasás) néhány soros programkódból megvalósítható volt még egy kezdő számára is.
A modern videókártyák megjelenésével megszűnt a pixel alapú rajzolás közvetlen támogatása. Így amennyiben ma valaki pixelekkel szeretne dolgozni, más utakat kell keresnie. Sajnos a interneten kevés információ áll rendelkezésre ennek hatékony megvalósítására. A gyakorlatban két lehetséges irány áll rendelkezésre, melyeket az alábbiakban ismertetjük.

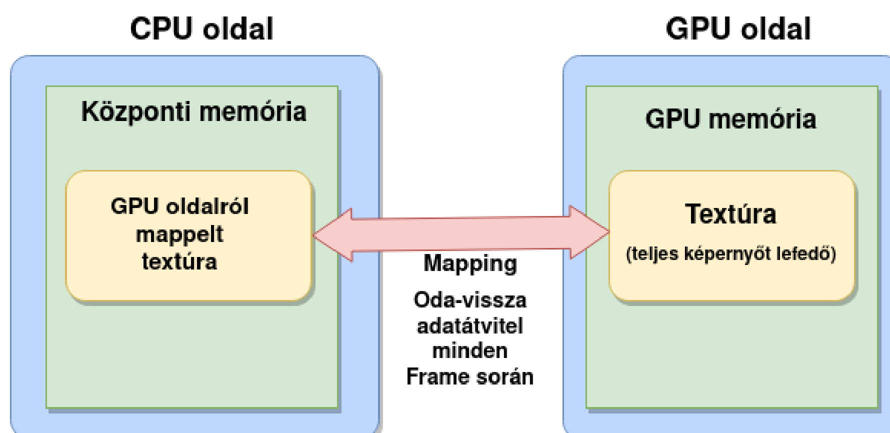
2.1. Rajzolás hardveres API-n keresztül

A mai videokártyák képességeit a két elérhető API-n (OpenGL, DirectX) keresztül tudjuk csak megfelelően kihasználni. Amennyiben magas teljesítményt szeretnénk elérni, célszerű tehát ezekből kiindulni, követni azt a folyamatot, amik szükségesek és amit elvárnak az API-k. Jelen cikkben a továbbiakban kizárólag az OpenGL API-t választjuk arra, hogy a pixel alapú megjelenítést megvalósítását bemutassuk.

Meg kell említeni, hogy az OpenGL-ben már a kezdetektől rendelkezésre állt egy olyan lehetőség, amellyel ez megvalósítható volt. A *glDrawpixels* egy rendkívül könnyen használható opció volt arra, hogy egy négyszögletes pixelhalmazt, egy adott memóriaterületet a központi memóriából a videokártya framebuffer-jébe írjunk. Bár nagyon kényelmes megoldás volt, az OpenGL 3.2-től kikerült a szabványból és többé nem támogatott. Hordozható/mobil eszközök esetén pedig sosem volt a szabvány (OpenGL ES) része [10]. Mindezeken felül a módszer teljesítménye nem feltétlenül volt kielégítő.

2.1.1. A pixel alapú rajzolás módszere

A GPU működésénél fogva arra van tervezve, hogy vertex és textúra adatokkal hatékonyan tudjon dolgozni. Olyan megoldást érdemes tehát választani, amely valamilyen szinten alkalmazza ezeket a feldolgozási folyamatokat.
A pixel szintű rajzolás megvalósításához alapesetben nincs szükség semmilyen sepeciális API-ra az OpenGL, vagy DirectX-en kívül. A megoldás kulcsgondolata az, hogy ortogonális projekciót használva létre kell hozni egy, a képernyő felbontásával egyező textúrát és ennek megjelenítéséhez pedig egy háromszög hálót, amely elegendő, ha két háromszögből tevődik össze. A két háromszögből alkotott négyszöget úgy határozzuk meg és pozícionáljuk felbontástól függően, hogy teljes mértékben fedje a képernyőt. Ezzel gyakorlatilag egy virtuális vásznat készítettünk, amire rajzolni kellene valahogy.
A rajzolás menete azonban nem teljesen triviális. Ugyanis bármely grafikai objektum, amelyet meg szeretnénk jeleníteni, a grafikus API-k (OpenGL, DirectX) elvárják, hogy az objektum minden adatai a GPU memóriában legyen (kivéve nagyon nagy világok esetében (streaming)). Természetesen innen fakad az az igény, hogy egyre több memóriával rendelkezzenek a GPU-k, hiszen a játék teljes aktuális megjeleníteni kívánt objektumai a GPU-ban kell elérhetők legyenek. OpenGL esetében VAO/VBO az az elvárt tárolási struktúra, amellyel hatékony rajzolási sebesség érhető el.
A probléma ott jelentkezik, hogy a GPU tárolja azt az adatstruktúrát, memóriaterületet, amelyet a CPU oldalról kell módosítani. A textúra objektum pixeleinek módosítására már több megoldás is jelentkezik, azonban mindegyik esetében számolni kell azzal, hogy a textúra adatokat, a memóriaterületet többször mozgatni kell a GPU memória (GPU oldal) és a központi memória (CPU oldal) között. A következő ábra ezt a folyamatot mutatja be:



Ábra 2. Szoftveres renderelés megvalósítása a mai GPU-kon

Első esetben akkor történik mozgatás, amikor rajzolni szeretnénk, másodszor pedig akkor, amikor végeztünk a pixelek módosításával, és az adatot ismét a video RAM-

ba töltjük fel. Ráadásul mindezt másodpercenként legalább 50-60-szor, amely egy kritikus elvárás a játékok esetében. Hogy az átvitt adatmennyiség érzékeltessük, egy 1920x1080 pixeles kép RGBA minőségben 8294400 byte mozgatást jelenti, amelyet 50-60-szor kell megtenni. Egy számítógépes játékban ritkán dolgozunk ekkora képekkel (esetleg a háttér), de kisebb méretű képekből azonban egyszerre általában több van képernyőn.
Tehát bármilyen megoldást is választunk azok közül, melyeket az OpenGL, vagy DirectX API-k nyújtanak, limitálva vagyunk az aktuális architektúra BUS sebessége által. A mai modern gépek többségében PCI Express 4.0-t használunk, amely egy 2011-es szabvány, melynek elméleti maximális átviteli sebessége 16 GT/s bit, amely éppen duplázz a PCI Express 3.0-t. Bár már rendelkezésre állnak a PCI Express 5.0 (2017) és a PCI Express 6.0 (2022) szabványok is, az azokat támogató hardverek családja csak évek múlva fog megjelenni.
A GPU memóriában elhelyezkedő pixel adatok CPU oldalon való módosítására több megoldás is rendelkezésre áll az OpenGL-ben:

- **glTexImage2D/ glTexSubImage2D:** klasszikus megoldás, amikor a *glTexImage2D* függvénnyel létrehozunk egy textúrát, a *glTexSubImage2D* függvénynel pedig igény szerint módosítjuk bizonyos részeit, vagy akár az egészet. is a conventional way to load texture data from an image source

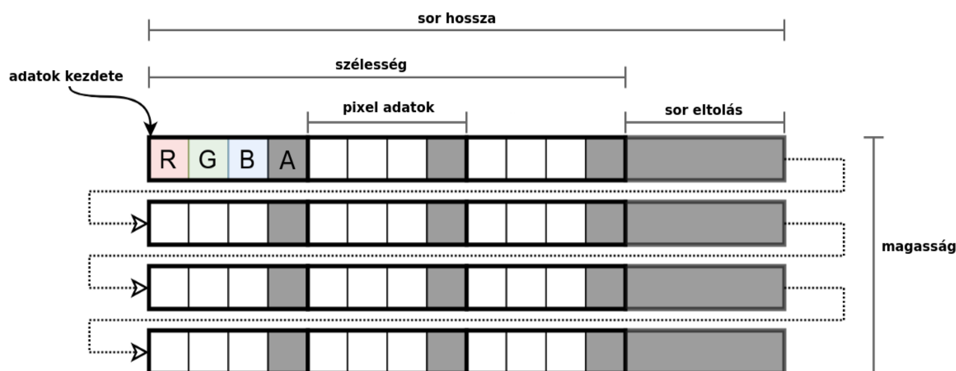
- **Pixel Buffer Object (PBO):** A PBO legnagyobb előnye, hogy gyors pixel adatátvitelt tesz lehetővé a DMA (Direct Memory Access) segítségével a videokártya és a központi memória között úgy, hogy a CPU-nak nem kell részt vennie ebben a folyamatban. Másik előnye pedig az aszinkron DMA átvitel.

3. Szoftveres rajzolás megvalósítása

A szoftveres raszterizáció gyakorlati hatékonysága nagymértékben függ a megvalósítás módjától. Alapvető igény a magas teljesítmény elérése, a széles körű optimalizáció, amely sok esetben komoly hozzáértést kíván meg. A következőkben néhány fontos szabályt és technikát tekintünk át.

3.1. Pixel alapú rajzolás a modern GPU-n

A mai szoftverek 32 bites (4 byte - RGBA) színmélységű képekkel dolgoznak. A textúrákat színcsatornák alapján két csoportba sorolhatjuk: vannak alfa csatornával rendelkező és nem rendelkező képi elemek. A megkülönböztetés azért fontos, mert a megjelenítési eljárás, a gyorsítási lehetőségek a két csoportnál eltérnek. Az alfa csatornát nem tartalmazó képek nem rendelkeznek átlátszósággal, csak RGB színkomponensekkel. Ez azt jelenti, hogy bármely két objektum egymásra rajzolható anélkül, hogy az egymás alatt lévő objektumok színét össze kellene mosni egymással, kirajzolási mechanizmusuk így gyorsabb és egyszerűbb lesz [18].
Az alfa csatornát tartalmazó képek kezelése bár nem nehezebb, de sokkal számítás igényesebb. Ennek oka az, hogy egy textúrán belül tetszőlegesen váltakozhatnak az átlátszó és a nem átlátszó részek (pl. karakter animáció, felhő, részecske effektek, stb.), amelyek miatt a kirajzolás ilyenkor pixelenként történik [18]. Amikor szoftveres raszterizációról beszélünk, akkor a képi objektumot pixeleit általában az alábbi formában tároljuk a központi memóriában:



Ábra 3. Pixelek tárolási formája a központi memóriában

A pixelek tehát négy komponensből (R, G, B, A) tevődnek össze, melyek mindegyike 1 byte. Ezek az értékek akkor érdekesek, amikor a video RAM-ba kell mozgatni a pixel tömböt. CPU oldalon, amikor számításokat végzünk a pixeleket szokás float-ként is tárolni [0,1] intervallumban.
A következőkben C++ nyelvű mintakódok segítségével bemutatjuk, miként lehet a pixeleket, magát a képet hatékonyan tárolni és kirajzolni. Fontos megjegyezni, hogy mivel a pixelenkénti rajzolás jelentős teljesítményt igényel a rengeteg memória olvasás és írás művelete miatt, így a kirajzolás ciklusában egy-egy nem optimalizált művelet erős csökkenést jelent a végső teljesítményben.

3.2. Naiv pixel alapú renderelés

A pixelek reprezentációjának legegyszerűbb formája, ha egy pixel minden komponense egy külön unsigned char-ként (0-255) kerül tárolásra. Ez a tárolási forma, amennyiben nem igénylünk semmilyen speciális tárolási formát, gyakorlatilag egyezik a GPU-ban létrehozott textúra (RGBA) tárolási formájával, melyet a CPU oldalra való mappelés során érhetünk el. Ez alapján egy képet tároló struktúra könnyedén létrehozható:

```
struct texture_t
{
    unsigned int width;                 // szélesség
    unsigned int height;                // magasság
    unsigned int internalFormat;        // a textúra formátuma
    unsigned char *texels;              // képpontok memória címe
};
```

A fenti definícióból a texels lesz az a memória blokk, amely majd tartalmazza a betöltött kép pixeleit, amely egy RGBA kép esetén a következőképpen jön létre:

```
texinfo.internalFormat = 4; // RGBA-t jelöl
texinfo.texels = (unsigned char *)malloc (sizeof (unsigned char) *
texinfo.width * texinfo.height * texinfo.internalFormat);
```

Egy így létrehozott pixeltömb kirajzolása viszonylag egyszerű. A példában feltételezzük, hogy a GPU oldalon megtörtént a textúra és a mögöttes, képernyőt lefedő mesh létrehozása. A textúra (képernyő) képpontjaint pedig a *gGraphics.GetFrameBuffer()* wrapper osztállyal elfedve tudjuk elérni. A rajzolás mechanizmusa ilyenkor:

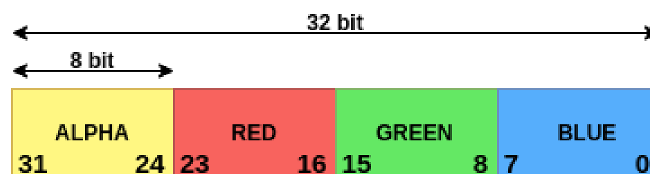
```
unsigned int wHelp = mTexture.width*4;
CFrameBuffer fbuffer = gGraphics.GetFrameBuffer();

for(unsigned int i=0; i < mTexture.width; i++){
    for(unsigned int j=0; j < mTexture.height; j++){

        unsigned int iHelp = i*4;
```

```
            unsigned char a = *(mTexture.texels + j*wHelp + iHelp + 3);
            unsigned char r = *(mTexture.texels + j*wHelp + iHelp + 2);
            unsigned char g = *(mTexture.texels + j*wHelp + iHelp + 1);
            unsigned char b = *(mTexture.texels + j*wHelp + iHelp);

     // do not draw if pixel is fully transparent
     if (a == 255) continue;

     if (position.x + x >= fbuffer.width || position.y + y >= fbuffer.height)
               continue;

     unsigned int offset = position.y+y*fbuffer.width + position.x + x;

           fbuffer.mFrameBuffer[offset] = r;
           fbuffer.mFrameBuffer[offset + 1] = g;
           fbuffer.mFrameBuffer[offset + 2] = b;
           fbuffer.mFrameBuffer[offset + 3] = a;
        }
    }
```

Mivel az ilyen típusú képek alpha csatornát is tartalmaznak, a rajzolás pixelenként történik [18]. Amennyiben a képernyőn számos objektum van, melyek mérete akár nagyobb is lehet, akkor jelentős teljesítményt igényel a másodpercenkénti 50-60 képernyő frissítés. Természetesen a fenti mintakód már tartalmaz egy-két optimalizációt (*wHelp*, *iHelp*), melyek segítenek, de sajnos ezek sem lesznek elegendők. Fontos megjegyezni, hogy a fenti példa nem tér ki arra, hogy az átlátszóság miatt az adott pixel írásakor az alatta lévő pixel színével azt össze kellene mosni.
A pixelek komponenseinek külön-külön tárolása nem csak a kirajzolásnál nem hatékony. Bármilyen egyéb műveletet kell elvégezni a képpel (forgatás, tükrözés, nyújtás, stb), a teljesítmény sosem lesz kielégítő.

3.2.1. Módosított pixel reprezentáció

Hatékonyabb megközelítés, ha a pixelek komponenseit valahogyan egyben tudjuk kezelni. RGBA esetén minden komponens 1 byte, azaz egy pixel tárolásához 4 byte = 32 bit szükséges. Ez a méret pedig gyakorlatilag megfelel egy integer értéknek. Tehát egy pixel komponensei “becsomagolhatók” egy integer változóba a következő bit pozíciókkal: kék komponens: 7-0, zöld komponens: 15-8, piros komponens: 23-16, alpa komponens: 31-24.



Ábra 4. Pixel komponensek 32 bites integer esetén

Ahhoz, hogy ez az új tárolási forma kihasználható legyen, a meglévő, központi memóriában lévő képi elemeket konvertálni kell ebbe a formába. Ezt a legcélszerűbb közvetlenül a képek fájlrendszerről való betöltése után megtenni. A következő mintakód bemutatja ezt az átalakítást:

```
int texel_length = mTexture.width*mTexture.height;
mTexture.int_texels = (uint32_t *)malloc(sizeof(uint32_t)*texel_length);

for(unsigned int i=0; i < mTexture.width; i++){
    for(unsigned int j=0; j < mTexture.height; j++){
```

```
            unsigned char r = *(mTexture.texels+j*mTexture.width*4 + (i*4) + 2 );
            unsigned char g = *(mTexture.texels+j*mTexture.width*4 + (i*4) + 1 );
            unsigned char b = *(mTexture.texels+j*mTexture.width*4 + (i*4) );

            uint32_t rr = (uint32_t)(r);
            uint32_t gg = (uint32_t)(g);
            uint32_t bb = (uint32_t)(b);
            uint32_t aa;

            unsigned char a = *(mTexture.texels+j*mTexture.width*4 + (i*4) + 3);
            aa = (uint32_t)(a);

            uint32_t color = (aa << 24) | (rr << 16) | (gg << 8) | bb;
            mTexture.int_texels[j * mTexture.width + i] = color;
        }
    }
```

A mintakódban bár nem került külön kiemelésre, de az *mTexure* struktúrába egy *uint32_t *int_texels;* változó is bekerült, amely az integer alapú pixelek tömbjét hivatott tárolni. A folyamat minden pixelen végighalad és elkészíti annak 32 bites integer megfelelőjét a szükséges bitűvelettel:

```
uint32_t color = (aa << 24) | (rr << 16) | (gg << 8) | bb;
```

Ettől fogva minden pixelt egyetlen integer érték reprezentál, amely komoly előnyöket szolgáltat majd a további műveletekben.

3.2.2. Rajzolás Integer alapú pixelekkel

Természetesen az egyik legfontosabb művelet mindig a rajzolás. De gyakorlatilag bármilyen műveletet is veszünk, jellegében nagyon hasonlítani fog az alább bemutatott kódhoz:

```
CFrameBuffer fbuffer = gGraphics.GetFrameBuffer();

for(unsigned int i=0; i < mTexture.width; ++i) {
     for(unsigned int j=0; j < mTexture.height; j++) {

        uint32_t w = j * mpTexture.width + i;
        uint32_t color = *(m_pTexture->int_texels + w);

        unsigned int offset = (position.y+j)*fbuffer.width + (position.x + i);

       if (offset < screen_buffer_size)
            fbuffer.mFrameBuffer[offset] = color;

        }
}
```

Jól látszik, hogy a rajzolás művelete lényegesen egyszerűsödött, sokkal átláthatóbb megoldást kapunk ezzel az új struktúrával. Mindezek mellett természetesen a rajzolás sebességében is számottevő javulást kell tapasztalnunk, amelyet a tesztelés során mutatunk be.

4.2.2.1 Vertikális tükrözés

Egy további érdekes művelet a pixelhalmaz tükrözése. Erre gyakran van szükség grafikus alkalmazások esetében. Jelen példa a vertikális tükrözést mutatunk be. Az integer alapú pixel struktúra szintén nagy előnyt jelent a műveletnél.

```
void CTexture::FlipVertical()
{
    int th = mTexture.height;
    int tw = mTexture.width;
```

```
    uint32_t *texels = new uint32_t[th * tw * 4];

     for(unsigned int i=0; i < th; i++){
        mempy(texels+(((th-1)-i)*tw),mTexture.int_texels+i*tw,tw*4);
    }

    delete [] m_pTexture.int_texels;
    mTexture.int_texels = texels;
}
```

4. Futási eredmények

A különböző raszterizációs technikák különböző teljesítménnyel rendelkeznek. A következőkben ezek sebességbeli különbségeit több tesztfeladat segítségével mutatjuk be. A tesztprogramok elkészítéséhez a C++ nyelvet és a GCC 11.2 fordítót használtuk, a méréseket pedig egy Core i7-9700-es 3 GHz CPU-val végeztük el Linux operációs rendszeren. A tesztekhez Intel UHD Graphics 630 integrált videómegjelenítőt használtunk. A szoftveres framebuffer megjelenítéséhez az OpenGL keretrendszert alkalmaztuk, ahol a GPU memóriában létrehozott teljes képernyős textúra megoldását választottuk. A pixelek raszterizációjában nem alkalmaztunk CPU oldalon párhuzamosítást, az eredmények 1 processzormag teljesítményét tükrözik.
A tesztek három csoportba bonthatók az alkalmazott képméret alapján. A legnagyobb kép 1024x1024, majd 256x256 végül 64x64. A tesztek során ugyanabból a típusú képből kis és nagy volumennel is rajzoltunk.

Táblázat 1. *Futási eredmények*

		Raszterizálás sebessége (FPS)	
Textúra mérete	**Darabszám**	**Naív rajzolás**	**Integer alapú pixel rajzolás**
1024x768	1	108	550
1024x768	10	15	398
256x256	10	139	658
256x256	100	16	323
64x64	100	225	727
64x64	200	124	655

Az eredmények jól mutatják, hogy az integer alapú pixel tárolás és rajzolás minden esetben a legjobb eredménnyel szerepelt, amely megfelel az elvártaknak. Jól látszik, hogy a klasszikus byte-onként rajzolásra nem nagyon építhető egy számítógépes játék, míg az integer alapú megoldás már alkalmas lenne erre a feladatra. Mindezek mellett nem szabad elfeledkezni arról, hogy itt még csak 1 CPU core került bevonásra. Többszálú rajzolás segítségével a fenti eredmények messze felülmúlhatók.

5. Összefoglalás

A modern számítógépes vizualizációban ma leginkább csak a GPU orientált megközelítésekkel találkozhatunk. A terület nagyon sokat fejlődött az elmúlt évek során, mára hatalmas piacot tudhat magának. A fejlődés előrehaladtával bár egyre jobb eszközök kerültek a programozó kezébe, megszűnt a fejlesztő teljhatalma a grafika programozásában. Ma már minden háromszög alapon készül, a pixel szintű egyedi képmanipulációk, és CPU oldal a renderelési folyamatba való bevonása

eltűnt. Jelen cikkben bemutatásra került az a technika, amellyel bár körülményesen, de továbbra is lehetőség nyílik a szoftveres megoldások alkalmazására. A teljesítmény adatokból jól látszik, hogy lehetne olyan magas szintű megoldásokat kidolgozni, amelyek nem kizárólag a GPU-ra épülnének. Az így létrejövő alkalmazások nem függenek annyira a GPU-tól növelve ezzel a platformok közötti átjárhatóságot, valamint a pixel szintű hozzáférhetőség új, kreatív lehetőségeket adna a fejlesztők kezébe.

Hivatkozások

[1] Zach, B.: *A Modern Approach to Software Rasterization*. University Workshop, Taylor University, 2011

[2] TransGaming Inc.: *Swiftshader Software GPU Toolkit*, 2023

[3] Microsoft Corporation: *Windows advanced rasterization platform (warp) guide, 2023*

[4] Michael Abrash: *Rasterization on larrabee*. Dr. Dobbs Portal, 2009

[5] Seiler L., Carmean D., Sprangle E., Forsyth T., Abrash M., Dubey P., Junkins S., Lake A., Sugerman J., Cavin R., Espasa R., Grochowski E., Juan T., Hanrahan P.: *Larrabee: a many-core x86 architecture for visual computing.* ACM Transactions on Graphics (TOG) - Proceedings of ACM SIGGRAPH,Volume 27 Issue 3., 2008 http://doi.acm.org/10.1145/1360612.1360617

[6] Rost, R.: *The OpenGL Shading Language*. Addison Wesley, 2004

[7] Laine S., Karras T.: *High-Performance Software Rasterization on GPUs.* High Performance Graphics, Vancouver, Canada, 2011 https://doi.org/10.1145/2018323.2018337

[8] Akenine-möller, T., haines, E.: *Real-Time Rendering*, A. K. Peters. 3nd Edition

[9] SUGERMAN, J., FATAHALIAN, K., BOULOS, S., AKELEY, K., AND HANRAHAN, P. (2009). *Gramps: A programming model for graphics pipelines*. ACM Trans. Graph. 28, 4:1–4:11, 2008 https://doi.org/10.1145/1477926.1477930

[10] Khronos Group: *OpenGL reference guide*, https://www.khronos.org/opengl/, 2023

[11] Agner F.: *Optimizing software in C++ An optimization guide for Windows, Linux and Mac platforms*. Study at Copenhagen University College of Engineering, 2021

[12] Swenney T.: *The End of the GPU Roadmap*. Proceedings of the Conference on High Performance Graphics, pp. 45-52, 2009

[13] Coffin C.: *SPU-based Deferred Shading for Battlefield 3 on Playstation 3*. Game Developer Conference Presentation, 2011

[14] RAD Game Tools: *Pixomatic advanced software rasterizer*, 2021

[15] EBERLY H, D.: *3D Game Engine Design: A Practical Approach to Real-Time Computer Graphics.* CRC Press; 2nd edition, 2006

[16] Péter Mileff, Judit Dudra: *The Past and the Future of Computer Visualization*, Production Systems and Information Engineering, Volume 10, No 1, pp. 16-29., 2022. https://doi.org/10.32968/psaie.2022.1.2.

[17] Video Electronics Standards Association: *VESA BIOS Extension - Core Functions Standard*, Version 3.0, 1998

[18] Péter Mileff, Judit Dudra: *Advanced 2D Rasterization on Modern CPUs*, Applied Information Science, Engineering and Technology: Selected Topics from the Field of Production Information Engineering and IT for Manufacturing: Theory and Practice, Series: Topics in Intelligent Engineering and Informatics, Vol. 7, Chapter 5, Springer International publishing, pp. 63-79. 2014. https://doi.org/10.1007/978-3-319-01919-2_5

[19] Xlib - C Language X Interface: https://www.x.org/wiki/, 2023

[20] Windows GDI technology, https://learn.microsoft.com/en-us/windows/win32/api/_gdi/, 2023